Vol.12, No.3, Fall 2023, pp.123-144 ISSN (Print):2322-1682 ISSN (Online):2383-3076

Journal of Geography and Environmental Hazards

RESEARCH ARTICLE DOI: 10.22067/geoeh.2023.79729.1305 Open access

Investigating the Relationship between Air Pollutants and Remote Sensing Indices (NDVI, NDBI, LST, and ATI) in Tehran

Sayedeh Zeinab Shogrkhodaei[a], Amanollah Fathnia[b*], Sirous Hashemi Darebadami[c]

[a] *PhD Candidate in Climatology, Razi University, Kermanshah, Iran*
[b] *Associate Professor in Climatology, Razi University, Kermanshah, Iran*
[c] *PhD Candidate in Remote Sensing and Geographic Information System, Tehran University, Tehran, Iran*

Received: 23 November 2022 ***Revised: 1 February 2023*** ***Accepted: 8 February 2023***

Abstract

Intra-urban air pollution is a major environmental and public health concern worldwide. As the capital of Iran, Tehran is increasing its population day by day, and it has caused problems such as air pollution, and its severity is subject to change every year. The aim of this study was to find a relationship between Remotely Sensed Indices with pollutants and air pollution modeling in Tehran. Pearson correlation coefficient was used to investigate the relationship between independent variables and pollutants and multivariate linear regression model was used to model it. Independent variables in this study are Land Surface Temperature (LST), Normalized Vegetation Difference Index (NDVI), Apparent Thermal Inertia (ATI), and Normalized Difference Built-Up Index (NDBI). The data obtained from Landsat 8 satellite images and MODIS sensor were used. Moreover, air pollution parameters were CO, NO_2 and SO_2, which were prepared in two spring (April) and summer (August July) of 2017. ENVI, ArcGIS and SPSS software were used to analyze the images and evaluate the relationship between the Remotely Sensed Indices and air pollutants and modeling. The results showed that the highest correlation between LST and SO_2 is in the spring (0.24), NDVI and SO_2 is in the spring (-0.36), ATI and CO is in the summer, and between NDBI and SO_2 is in the summer. Also, the results of the model for the statistical coefficient of determination (R^2) showed a value between 0.33 and 0.8, and for the statistical root-mean-square error (RMSE) showed a value of 5.05-47.47. It was also found that NDVI and LST are inversely related, and that NDBI was indirectly related to air pollutants.

Keywords: Air Pollution, Pearson Correlation, Tehran City, Remote Sensing Index

*.Corresponding Author: Amanollah Fathnia Email: a_fathnia@razi.ac.ir Tel: +989192970334

How to cite this Article: Shogrkhodaei, S. Z., Fathnia, A., & Hashemi Darebadami, S. (2023). Investigating the relationship between air pollutants and remote sensing indices (NDVI, NDBI, LST and ATI) in Tehran. *Journal of Geography and Environmental Hazards, 12*(3), 123-144.
DOI: 10.22067/geoeh.2023.79729.1305

Geography and Environmental Hazards
Volume 12, Issue 3 - Number 47, Fall 2023
https://geoeh.um.ac.ir
https://doi.org/10.22067/geoeh.2023.79729.1305

جغرافیا و مخاطرات محیطی، سال دوازدهم، شمارۀ چهل و هفتم، پاییز ۱۴۰۲، صص ۱۴٤-۱۲۳

مقاله پژوهشی

بررسی ارتباط آلاینده‌های هوا با شاخص‌های سنجش‌ازدور (NDVI،NDBI، LST و ATI) در شهر تهران

سیده‌زینب شگرخدایی- دانشجوی دکتری اقلیم‌شناسی، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران.
امان‌اله فتح‌نیا[1]- دانشیار اقلیم‌شناسی، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران.
سیروس هاشمی‌دره‌بادامی- دانشجوی دکتری سنجش‌ازدور و سامانه اطلاعات جغرافیایی، دانشگاه تهران، تهران، ایران

تاریخ دریافت: ۱٤۰۱/۹/۲ تاریخ بازنگری: ۱٤۰۱/۱۱/۱۲ تاریخ تصویب: ۱٤۰۱/۱۱/۱۹

چکیده

آلودگی هوای شهری یک نگرانی عمده زیست‌محیطی و بهداشت عمومی در سراسر جهان است. هرروزه بر جمعیت شهر تهران به‌عنوان پایتخت ایران افزوده می‌شود که مشکلاتی از قبیل آلودگی هوا را به دنبال داشته و هرسال بر شدت آن نیز افزوده می‌شود. ازاین‌رو هدف این مطالعه یافتن ارتباط شاخص‌های سنجش‌ازدوری با آلاینده‌های هوا در سطح شهر تهران است. شاخص‌های مورداستفاده در این مطالعه شامل: دمای سطح زمین (LST)، شاخص نرمال شده تفاضلی پوشش گیاهی (NDVI)، اینرسی حرارتی ظاهری (ATI) و شاخص تفاضلی نرمال شده مناطق ساخته شده (NDBI) استخراج شده از داده‌های تصاویر سنجنده OLI و مودیس، همچنین پارامترهای آلاینده هوا شامل CO، NO_2 و SO_2 طی ماه‌های آگوست، جولای و آوریل سال ۲۰۱۷ است. برای بررسی ارتباط بین شاخص‌های سنجش‌ازدور و آلاینده‌ها از ضریب همبستگی پیرسون استفاده شد. نتایج نشان داد در فصل بهار بالاترین مقدار همبستگی مثبت بین LST و SO_2 (۰/۲٤) و بیشترین میزان همبستگی منفی بین NDVI و SO_2 (۰/۳٦-) مشاهده شد.

۱ نویسنده مسئول: ۰۹۱۹۲۹۷۰۳۳٤ Email: a_fathnia@razi.ac.ir

نحوه ارجاع به این مقاله:

شگرخدایی، سیده زینب؛ فتح نیا، امان اله؛ هاشمی دره بادامی، سیروس؛ ۱٤۰۲. بررسی ارتباط آلاینده‌های هوا با شاخص‌های سنجش از دور (NDVI،NDBI، LST و ATI) در شهر تهران. *جغرافیا و مخاطرات محیطی*. ۱۲(۳)،صص ۱٤٤-۱۲۳
https://doi.org/10.22067/geoeh.2023.79729.1305

همچنین در فصل بهار بالاترین همبستگی مشاهده شده بین ATI و CO (۰/۲٤) و NDBI و SO_2 (۲۷/.) وجود داشت. علاوه براین ارتباط قوی و منفی بین NDBI و NDVI به ترتیب در فصل بهار و تابستان (۰/۸٤-،۰/۹۱-) وجود دارد.

کلیدواژه‌ها: آلودگی هوا، همبستگی پیرسون، شهر تهران، شاخص سنجش‌ازدوری.

۱- مقدمه

گسترش مناطق شهری تأثیر قابل‌توجهی بر کاربری زمین با تغییر پوشش گیاهی به مسکونی و تجاری و زیرساخت‌های مرتبط با آن دارد که باعث افزایش درجه حرارت زمین می‌شود (ابراهیم و رسول[1]، ۲۰۱۷). سطوح غیرقابل نفوذ عمدتاً با مواد غیرقابل نفوذی مانند آسفالت، بتن و سنگ، ساخته می‌شوند. سطوح غیرقابل نفوذ شهری مانند سطوح سنگلاخی بیابان رفتار می‌کنند، چراکه این سطوح رسانایی و ذخیره‌سازی گرمای بالایی در مقایسه با سطوح قابل‌نفوذ (پوشش گیاهی) دارند (بارنز[2] و همکاران، ۲۰۰۱). جایگزین شدن پوشش طبیعی زمین با ساخت‌وسازهای شهری، اثرات خنک‌کنندگی سطوح طبیعی را از بین می‌برد (گورسوسکی[3] و همکاران، ۱۹۹۸) و استفاده از سوخت‌های فسیلی برای سرمایش و گرمایش باعث افزایش دمای هوای محیط می‌شود که در ادامه این تغییرات، جزیره حرارتی به وجود می‌آید (هاشمی‌دره‌بادامی، ۱۳۹٤). جزایر حرارتی شهری، مرگ‌ومیر مرتبط با گرما و آلودگی را افزایش و آسایش حرارتی را کاهش می‌دهد و تقاضا برای انرژی را بالا می‌برد (میرزایی[4]، ۲۰۱۵). آلودگی هوا به‌طور مستقیم با سلامت انسان در ارتباط است (ارکو[5] و همکاران، ۲۰۱۸؛ آتکینسون[6] و همکاران، ۲۰۱۳). ازاین‌رو برای حفظ قابل‌قبول کیفیت هوا، همواره نیازمند اطلاعات به‌موقع تغییرات آن هستیم (موزومدر[7] و همکاران، ۲۰۱۳). کلان‌شهر تهران در یک قرن اخیر با شتاب بسیار رشد کرده و این رشد سریع سبب تحولات و تغییرات مهمی در شکل فضایی آن شده است (رفیعیان و شالی، ۱۳۹۱). ازآنجایی‌که دو گروه عمده صنایع آلاینده در اطراف تهران شامل تولید خودرو و سوخت هستند و از طرفی در شهر، مصرف‌کنندگان خانگی، مصرف‌کنندگان اصلی انرژی هستند؛ به‌این‌ترتیب دو گروه اصلی آلاینده هوا صنایع و خانوارها هستند (وفا-آرانی[8] و همکاران، ۲۰۱٤). راه‌ها و شریان‌های ارتباطی شهر تهران با جمعیت حدود ۹ میلیون نفر حجم بالایی از اتومبیل‌ها را در تمام ساعات شبانه‌روز جابه‌جا می‌کند که عامل اصلی تولید دی‌اکسیدنیتروژن، دی‌اکسید گوگرد (نورپور و فیض، ۱۳۹۳) و مونوکسیدکربن (سجادیان،

1 Ibrahim & Rasul
2 Barnes
3 Gorsevski
4 Mirzaei
5 Erqou
6 Atkinson
7 Mozumder
8 Vafa- Arani

۱۳۹٤؛ متکان و همکاران، ۱۳۸۸) است. به‌طورکلی تراکم بالای شهر تهران و تمرکز صنایع در حاشیه شهر موجب بروز جزایر حرارتی و آلودگی هوای شهری شده است (هاشمی و همکاران، ۱۳۹۷). ازاین‌رو بررسی ارتباط پارامترهای آلودگی هوا با شاخص‌های مستخرج از تصاویر ماهواره‌ای می‌تواند به فهم بهتر و برنامه‌ریزی دقیق‌تر برای کاهش سطوحی که باعث تشدید آلودگی هوا می‌شود کمک کند. یکی از محدودیت‌هایی که بیشتر در مطالعات انجام شده در آسیا و کشورهای توسعه نیافته مشاهده می‌شود تعداد پایین ایستگاه‌های پایش آلودگی هوا است که امکان نمایش توزیع آلودگی هوا را با دقت زیاد محدود می‌کند (امینی[1] و همکاران، ۲۰۱٤). برخی مطالعات که با محدودیت در ایستگاه‌های پایش آلودگی روبرو بوده‌اند از متغیرهایی مانند پوشش گیاهی در ارتباط با آلاینده‌ها استفاده کرده‌اند (وو[2] و همکاران، ۲۰۱۷). استفاده از داده‌های سنجش‌ازدور می‌تواند برای شناخت پوشش زمین مرتبط با آلاینده‌ها به محققان کمک کند تا بررسی دقیقی از کیفیت هوا داشته باشند. سنجش‌ازدور تکنیکی است که امکان نظارت و نمایش تغییرات پدیده‌های سطح زمین را در طول زمان فراهم می‌آورد (سهرابی‌نیا و خورشیددوست[3]، ۲۰۰۷). تحقیقات مختلفی در سطح جهان و ایران در ارتباط با آلاینده‌ها و کاربری اراضی صورت گرفته است که در اینجا به برخی موارد اشاره می‌شود. برخی از مطالعات انجام شده برای مدل‌سازی آلودگی هوا با استفاده از تکنیک LUR نشان داده‌اند که استفاده از داده‌های ماهواره‌ای نتیجه را بهبود می‌بخشد (وینئو[4] و همکاران، ۲۰۱۳). محمدی و همکاران (۱۳۹۷) برای پیش‌بینی آلاینده‌های NO_2، CO و PM_{10} در شهر تهران از مدل رگرسیون کاربری اراضی، استفاده کردند. وحدت و علی‌محمدی (۱۳۹۹) با مطالعه تغییرپذیری ساعتی رابطهٔ پارامترهای کاربری اراضی با آلایندهٔ CO، به این نتیجه رسیدند که مدل‌های کلی و ساعتی بخصوص در فصل تابستان در تخمین آلاینده CO نسبت به دیگر آلاینده‌ها بالاتر است. نتایج بررسی فضایی آلاینده‌های هوا در شهر اصفهان نشان می‌دهد که مهم‌ترین آلاینده‌های هوا حجم ترافیک، جمعیت و کاربری اراضی است (شریفی سده و احمدی ندوشن، ۱۳۹۷). مطالعات نشان می‌دهد با گسترش شهرنشینی، بیابان‌زایی و هر فرآیندی که در نتیجه افزایش سطوح غیرگیاهی باشد، دمای هوا افزایش می‌یابد (فیضی‌زاده و همکاران، ۲۰۱۳). نتایج تحقیقات در شهر تهران نشان می‌دهد طی سه دهه اخیر (۱۹۸۵–۲۰۱۵) بین مقدار سطوح ساخته شده و مقدار دمای سطح ارتباط قوی و مثبت وجود دارد (شفیعی و همکاران، ۱۳۹٦). مطابق با مطالعات انجام شده، گسترش سطوح نفوذناپذیر رابطه مستقیم با دمای هوا و رابطه معکوس با پوشش گیاهی دارد (اصغری سراسکانرود و امامی، ۱۳۹۷؛ خسروی و همکاران، ۱۳۹٦؛ ساسان‌پور و همکاران، ۱۳۹۲؛ بویادی[5] و همکاران، ۲۰۱۳؛ یوآن و بائور[6]، ۲۰۰۷). همچنین ارتباط

1 Amini
2 Wu
3 Sohrabinia and Khorshiddoust
4 Vienneau
5 Buyadi
6 Yuan & Bauer

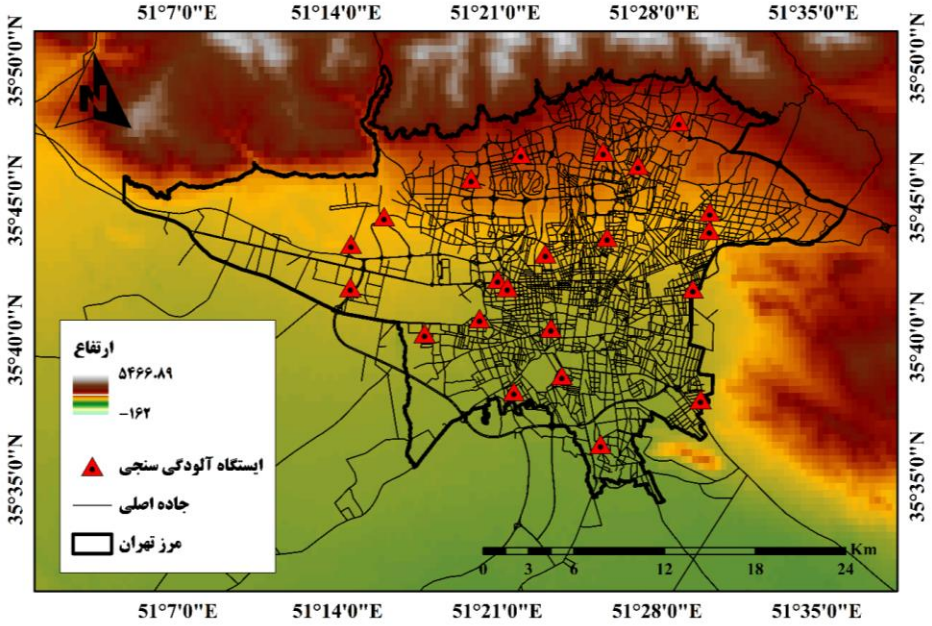
مثبت و معنی‌دار بین LST و پارامترهای آلودگی هوا وجود دارد (هاشـــم و ســـلطان[1]، ۲۰۱۰)، به‌گونه‌ای که با افزایش مقدار LST بر مقدار آلاینده‌ها افزوده می‌شـــود (ژنگ[2] و همکاران، ۲۰۱۷؛ آروین و همکاران، ۱۳۹٦). در مطالعات انجام شده مرتبط با شهر تهران، اغلب ارتباط شاخص‌هایی مانند LST و NDVI با آلودگی هوا بررسی شده است و ارتباط شاخص‌هایی مانند NDBI که با سطوح ساخته شده و راه‌های ارتباطی درون‌شهری مرتبط است و شاخص اینرسی حرارتی ظاهری با آلودگی هوا موردتوجه قرار نگرفته اســـت. لذا هدف این مطالعه بررســـی ارتباط شـــاخص‌های ســـنجش‌ازدوری (ســـطوح نفوذناپذیر[3] (NDBI))، دمای ســـطح زمین[4] (LST)، اینرســـی حرارتی ظاهری[5] (ATI) و شاخص تفاضلی نرمال شده پوشش گیاهی[6] (NDVI) استخراج شده از تصاویر سنجنده OLI و TIRS و MODIS) با پارامترهای آلاینده‌های هوا (NO_2، SO_2 و CO) با استفاده از ضریب همبستگی پیرسون است.

۲- مواد و روش

۲-۱- موقعیت منطقه مورد مطالعه

در این مطالعه ابتدا داده‌های ۲۳ ایســـتگاه آلودگی‌ســـنجی شـــهر تهران شـــامل NO_2، SO_2 و CO طی ماه‌های آوریل، آگوست و جولای سال ۲۰۱۷ از شرکت کنترل ترافیک وابسته به شهرداری تهران و سازمان محیط‌زیست اخذ گردید (http://air.tehran.ir). موقعیت ایستگاه‌های آلودگی‌سنجی شهر تهران در شکل ۱ نمایش داده شده است.

1 Hashim& Sultan
2 Zheng
3 Normalized Difference Built-up Index
4 Land Surface Temperature
5 Apparent Thermal Inertia
6 Normalized Difference Vegetation Index



شکل ۱- موقعیت مکانی ایستگاه‌های آلودگی‌سنجی شهر تهران

همچنین برای استخراج شاخص‌های سنجش‌ازدوری (NDBI، LST، NDVI و ATI) و چند شاخص محاسبه شده از ترکیب سطوح نفوذناپذیر با LST و NDVI از تصاویر سنجنده‌های OLI/TIRS و MODIS استفاده شد. ویژگی داده‌های ماهواره‌ای مورداستفاده در جدول ۱ نمایش داده شده است.

جدول ۱- تعداد و زمان تصاویر مورداستفاده در مطالعه

سنجنده	تاریخ تصویربرداری	قدرت تفکیک مکانی	تعداد تصاویر
OLI/TIRS(Landsat8)	۲۰۱۷/۰۴/۲۰	۳۰ متر	۳ تصویر
	۲۰۱۷/۰۷/۲۵		
	۲۰۱۷/۰۸/۲٦		
MODIS (Terra, Aqua) (تصاویر ۸ روزه و ۱٦ روزه)	آوریل ۲۰۱۷	۲۵۰ متر	۸ تصویر ۱۰ روزه و ٤ تصویر ۱٦ روزه
	جولای ۲۰۱۷		
	آگوست ۲۰۱۷		

۲-۲- روش پژوهش

برای استخراج شاخص‌های سنجش‌ازدوری، ابتدا در نرم‌افزار ENVI تصحیحات هندسی و رادیومتریک انجام گرفت. سپس با محاسبه شاخص‌های مربوطه (LST، NDVI، ATI، NDBI)، نتایج در نرم‌افزار ArcMap تجزیه‌وتحلیل شدند. برای بررسی مقدار همبستگی از نرم‌افزار SPSS و روش پیرسون استفاده شد.

۲-۲-۱- محاسبه شاخص‌های سنجش‌ازدور

بازیابی دمای درخشندگی

دمای درخشندگی با استفاده از ضرایب کالیبراسیون سنجنده از رابطه ۱ به‌دست آمد:

$$T = \frac{K_2}{\ln\left(\frac{K_1}{L_\lambda} + 1\right)}$$

رابطه ۱)

T دمای درخشندگی در سطح سنجنده برحسب کلوین (K)، L_λ تابش طیفی در بالای اتمسفر در سنجنده [W/(m^2sr µm)]، K_2 ضریب کالیبراسیون برحسب کلوین (۷۷۷/۸۹ برای باند ۱۰ و ۴۸۰/۸۹ برای باند ۱۱)، K_1 ضریب کالیبراسیون بر حسب [W/(m^2 Sr µm)] (۱۳۲۱/۰۸ برای باند ۱۰ و ۱۲۰۱/۱۴ برای باند ۱۱) (هاشمی‌دره‌بادامی، ۱۳۹۴).

بازیابی توان تشعشعی سطح زمین (LSE) به روش آستانه NDVI

شاخص NDVI بر پایه ارتباط جذب انرژی در محدوده طیفی قرمز توسط کلروفیل و افزایش انعکاس در انرژی مادون‌قرمز نزدیک برای پوشش گیاهی سالم استوار است (لنی[1]، ۱۹۹۶) و از رابطه ۲ به‌دست آمد:

$$NDVI = \frac{\rho_{NIR} - \rho_{RED}}{\rho_{NIR} + \rho_{RED}}$$

رابطه ۲)

ρ_{NIR} بازتاب باند مادون‌قرمز نزدیک ρ_{RED} بازتاب باند قرمز است. شاخص NDVI به‌دست آمده از دو سنجنده به‌منظور تفکیک مکانی بهتر با هم ادغام شد (امیری[2] و همکاران، ۲۰۰۹). سپس در محیط ArcMap با استفاده از ابزار Raster calculator میانگین NDVI محاسبه و برای هر ایستگاه استخراج گردید.

برای محاسبه کسر پوشش گیاهی، تصاویر NDVI به‌صورت خطی بین خط خاک خشک ($NDVI_{min}$) و پوشش گیاهی متراکم ($NDVI_{max}$) از رابطه ۳ استفاده شد. این عملیات خطی می‌تواند خطای رخ‌داده در عملیات کالیبراسیون و تصحیح اتمسفری را کاهش دهد (امیری[3] و همکاران، ۲۰۰۹).

$$FVC = \left[\frac{NDVI - NDVI_{min}}{NDVI_{max} - NDVI_{min}}\right]^2$$

رابطه ۳)

1 Lenney
2 Amiri
3 Amiri

$NDVI_{min}$ مربوط به کمترین مقدار NDVI (خاک خشک) و $NDVI_{max}$ مربوط به بیشترین مقدار NDVI (پوشش گیاهی متراکم) است. با محاسبه FVC توان تشعشعی از رابطه ٤ محاسبه شد:

$$\varepsilon = a + b\rho_{red} \quad (FVC = 0) \quad \xrightarrow{TIRS1} = 0.979 - 0.046 r_{OLI-B4}$$
$$\xrightarrow{TIRS2} = 0.982 - 0.027 r_{OLI-B4}$$
$$\varepsilon = \varepsilon_S(1-FVC) + \varepsilon_V FVC \quad (0 < FVC < 1) \quad \xrightarrow{TIRS1} = 0.971(1\text{-}FVC) + 0.987FVC$$
$$\xrightarrow{TIRS2} = 0.977(1\text{-}FVC) + 0.989FVC$$
$$\varepsilon = 0.99 \quad (FVC = 1)$$
رابطه ٤)

ρ_{red} بازتاب در باند قرمز سـنجنده OLI (باند ٤)، a و b ضـرایب همبسـتگی خطی بازتاب باند قرمز با توان تشعشعی، ε_S توان تشعشعی خاک، ε_V توان تشعشعی پوشش گیاهی (هاشمی‌دره‌بادامی، ١٣٩٤).

بازیابی دمای سطح زمین با روش پنجره مجزا (SW)

الگوریتم SW با استفاده از دو باند حرارتی معادله ارائه‌شـده توسط سوبرینو و همکاران (١٩٩٧) و اعمال‌شـده بروی سنجنده‌های مختلف رصد زمین توسط سوبرینو و مونوز (٢٠٠٨) است.

$$T_S = T_i + c_1(T_i - T_j) + c_2(T_i - T_j)^2 + c_0 + (c_3 + c_4 w)(1-\varepsilon)(c_5 + c_6 w)\Delta\varepsilon$$
رابطه ٥)

T_i و T_j دمای درخشندگی در سطح سنجنده در باندهای مورداستفاده در الگوریتم، ε میانگین توان تشعشعی از دو باند $\varepsilon = 0.5\,(T_i - T_j)$، $\Delta\varepsilon$ تفاضل توان تشعشعی دو باند $\Delta\varepsilon = (T_i - T_j)$، W مقدار محتوای بخارآب اتمسفر (گرم بر سانتی‌متر مربع) و C_0 تا C_6 ضرایب SW که از داده‌های شبیه‌سازی‌شده تعیین می‌شود. این ضرایب در جدول ٢ نشان داده شده است.

جدول ٢- مقادیر ضرایب مورداستفاده در الگوریتم

ضریب	C_0	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5	C_6
ارزش	-۰/۲٦۸	۱/۳۷۸	۰/۱۸۳	٥٤/۳	-۲/۲۳۸	-۱۲۹/۲۰	۱٦/٤

بازیابی آلبدوی سطح

چندین الگوریتم توسط لیانگ (۲۰۰۵) مطرح شدند که به‌منظور استخراج آلبدو در سنجنده‌های پهن باند با استفاده از ترکیب باندهای مختلف با تطبیق باندهای متناظر OLI با باندهای سنجنده +ETM، از الگوریتم مورداستفاده برای بازیابی آلبدو از باندهای +ETM برای بازیابی آلبدوی سنجنده OLI توسط رابطه ٦ استفاده شد:

$$\alpha_{short} = 0.365\alpha_2 + 0.130\alpha_4 + 0.373\alpha_5 + 0.085\alpha_6 + 0.072\alpha_7 - 0.0018$$ رابطه ٦)

محاسبه اینرسی حرارتی

اینرسی حرارتی ظاهری (ATI) با استفاده از داده‌های LST در شب و روز و آلبدوی سطح زمین از رابطه ۷ محاسبه شد (پرایس[1]، ۱۹۸۵):

$$ATI = \frac{1 - Albedo}{T_s day - T_s night}$$ رابطه ۷)

در اینجا، ATI اینرسی حرارتی ظاهری، Tsday و Tsnight دمای سطح زمین در روز و شب است. محاسبه اینرسی حرارتی در بافر ۱۰۰۰ متر در شکل ۲ نشان داده شده است.

محاسبه شاخص سطوح نفوذناپذیر NDBI

NDBI به‌عنوان شاخصی برای شدت توسعه شهری و هم شاخصی برای سطوح نفوذناپذیر شهری مورداستفاده قرار می‌گیرد (هاشمی و همکاران، ۱۳۹۷). مقدار NDBI بین ۱+ تا ۱− است. مقدار مثبت برای پهنه‌های آبی و مناطق با تراکم بالای ساخت وساز، درحالی‌که مقدار منفی برای نمایش دیگر انواع پوشش زمین به کار برده می‌شود (ابراهیم و رسول، ۲۰۱۷):

$$NDBI = \frac{MIR_{um} - NIR_{um}}{MIR_{um} + NIR_{um}}$$ رابطه ۸)

که در اینجا NIR_{um} معرف باند طول‌موج کوتاه مادون‌قرمز و MIR_{um} معرف باند حرارتی است.

1 Price

۲-۲-۲- محاسبه میزان همبستگی

ضریب همبستگی پیرسون یکی از پرکاربردترین روش‌های آماری است که به بررسی جهت و اندازه هم خطی بودن بین متغیر مستقل و وابسته می‌پردازد (کیم[1] و همکاران، ۲۰۱۵). برای محاسبه این ضریب از نرم‌افزار SPSS استفاده شد.

۳- نتایج

۳-۱- غلظت آلاینده‌های NO_2، SO_2 و CO و ارزیابی دقت داده‌ها

میانگین غلظت آلاینده‌ها در فصل بهار برای CO برابر ۲/۲٤ppm، برای NO2 برابر ٤٤/۹۲ ppb، برای SO_2 برابر ۷/۰۸ ppb است. در فصل تابستان میانگین غلظت CO برابر با ۲/٤۱ ppm، مقدار NO_2 برابر با ۵۰/۲۷ ppb، میانگین غلظت SO_2 برابر با ٦/۱۲ ppb است. با توجه به غلظت‌های به‌دست آمده بیشینه مقدار آلاینده‌های CO و NO_2 مربوط به فصل تابستان و بیشینه مقدار SO_2 مربوط به فصل بهار بوده است. نتایج توصیف پارامترهای آلودگی هوا در جدول ۳ نشان داده شده است.

جدول ۳- توصیف آماری پارامترهای آلودگی هوای مورداستفاده

فصل	آلاینده	حداکثر	حداقل	میانگین
بهار	CO	۵/۵	۰/٤	۲/۲٤
	NO_2	۹۷	۲/۵	٤٤/۹
	SO_2	۳٦	۱	۷/۰۸
تابستان	CO	٦/۱	۰/٦	۲/٤۱
	NO_2	۱۱۲	۷	۵۰/۲۷
	SO_2	۳۰	۱	٦/۱۲

برای ارزیابی دقیق برای بررسی ارتباط بین دمای سطح زمین به‌دست آمده از سنجنده مادیس و دمای اندازه‌گیری شده توسط ایستگاه هواشناسی فرودگاه امام مقدار RMSEدر دو فصل بهار و تابستان محاسبه شد. مقدار RMSE به دست آمده در هر دو فصل در جدول ٤ ارائه شده است. با توجه به جدول صحت داده‌های به‌دست آمده از سنجنده مادیس را می‌توان تأیید کرد.

1 Kim

جدول ٤- محاسبه مقدار RMSE بین داده‌های میانگین روزانه فرودگاه امام و LST

فصل	بهار	تابستان
RMSE	٥/٧٤	٣/٤٤

۳-۲- ارتباط شاخص‌های سنجش‌ازدور و آلاینده‌های هوا

با توجه به ضرایب به‌دست آمده از محاسبه ضریب همبستگی پیرسون بین شاخص‌های سنجش‌ازدور (LST، NDVI،ATI ، NDBI) و آلاینده‌های NO_2، SO_2 و CO (جدول ٥) مشخص شد که تمام آلاینده‌ها در هر دو فصل بهار و تابستان با شاخص NDVI رابطه منفی داشتند. این رابطه برای آلاینده SO_2 در فصل بهار قوی‌تر (٠/٣٦-) بود. LST با غلظت آلاینده‌ها ارتباط مثبت دارد. این ارتباط برای SO_2 در فصل بهار قوی‌تر (٠/٢٤) از سایر آلاینده‌ها بود. بین ATI و آلاینده‌ها نیز ارتباط مثبت مشاهده شد، یعنی کاهش و افزایش آلاینده‌ها با مقدار ATI در یک راستا است. همچنین مشخص شد که بیشینه مقدار همبستگی برای آلاینده CO در فصل تابستان (٠/٢٤) است. ارتباط بین NDBI و آلاینده‌ها در هر دو فصل مثبت و بیشترین مقدار برای آلاینده SO_2 در تابستان (٠/٢٧) بود.

جدول ٥- نتایج ضریب همبستگی پیرسون بین آلاینده‌ها و داده‌های سنجش‌ازدور

Index	CO		NO_2		SO_2	
	بهار	تابستان	بهار	تابستان	بهار	تابستان
LST	٠/١٣	٠/١١	٠/١٤	٠/١٢	٠/٢٤	٠/١٩
NDVI	-٠/٠٥	-٠/٠٤	-٠/٢٩	-٠/٠٩	-٠/٣٦	-٠/٢٩
ATI	٠/١٢	٠/٢٤	٠/١٥	٠/١٢	٠/١٤	٠/٠٦
NDBI	٠/٠١	٠/١٧	٠/٢	٠/٢٤	٠/٠٣	٠/٢٧

۳-۳- همبستگی پیرسون بین سه شاخص LST، NDVI و ATI با NDBI

نتایج مربوط به مقدار همبستگی پیرسون بین سه شاخص LST ، NDVI و ATI با NDBI در جدول ٦ نشان داده است. طبق نتایج، ارتباط منفی و قوی بین NDBI و NDVI در هر دو فصل تابستان (٠/٨٤-) و بهار (٠/٩١-) وجود دارد. این ارتباط بیانگر این موضوع است که هرچقدر سطوح غیرقابل نفوذ افزایش یابد، از مقدار NDVI به‌شدت کاسته می‌شود. ارتباط مثبتی بین NDBI و LST در هر دو فصل مشاهده شد و مقدار آن برای تابستان (٠/٢٢) بیشتر از بهار (٠/١٥) است، یعنی با افزایش مقدار سطوح غیرقابل نفوذ بر مقدار LST نیز افزوده شده و بیشترین مقدار در فصل تابستان (٠/٢٢) مشاهده شد. همبستگی NDBI و ATI نیز مثبت است و بیشینه آن در فصل تابستان (٠/٤٤)

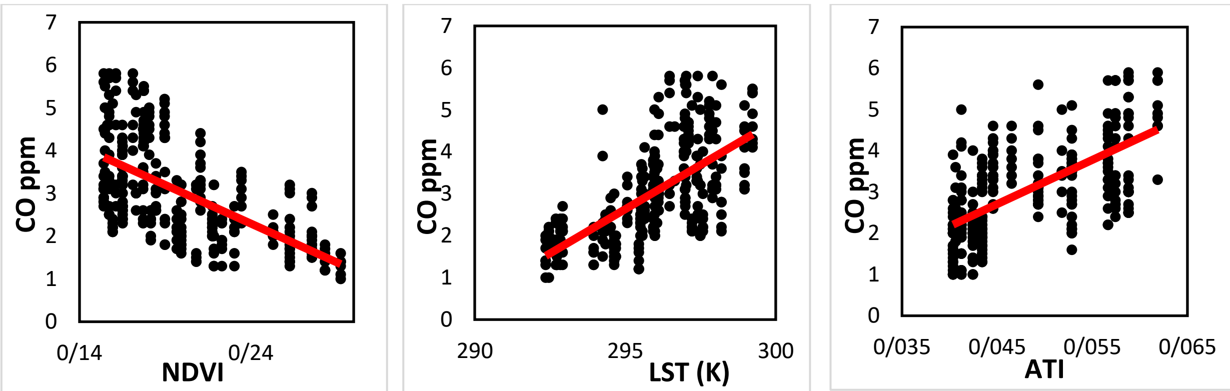
قرار دارد. ضریب همبستگی پیرسون برای سه شاخص LST، NDVI و ATI با NDBI در جدول ٦ نشان داده شده است.

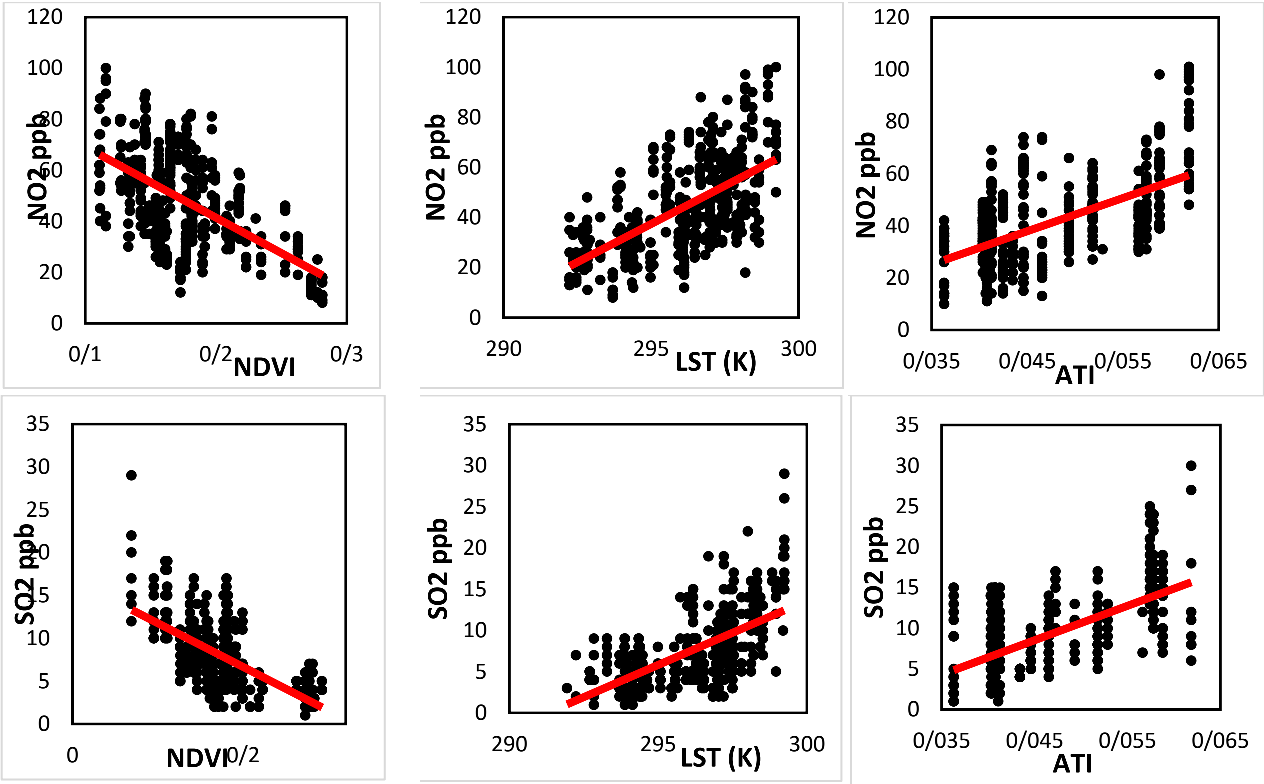
جدول ٦- محاسبه ضریب همبستگی پیرسون بین سه شاخص LST، NDVI و ATI با NDBI

Index	LST		NDVI		ATI	
	بهار	تابستان	بهار	تابستان	بهار	تابستان
NDBI	۰/۱۵	۰/۲۲	-۰/۹۱	-۰/۸٤	۰/۲۷	۰/٤٤

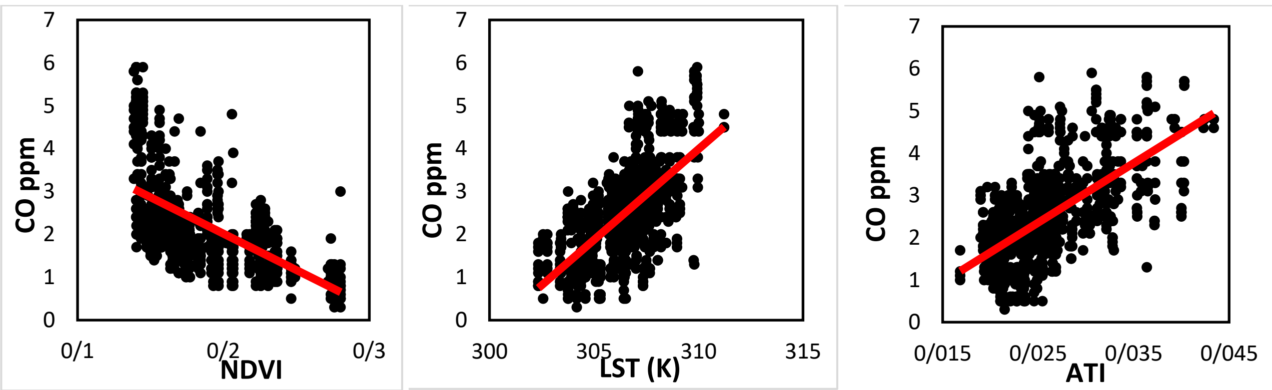
پراکندگی داده‌های مربوط به آلاینده‌های NO_2، SO_2 و CO در فصل بهار و تابستان نسبت به شاخص‌های سنجش‌ازدور (INERTIA، LST و NDVI) در شکل ۲ و ۳ نشان داده شده است.

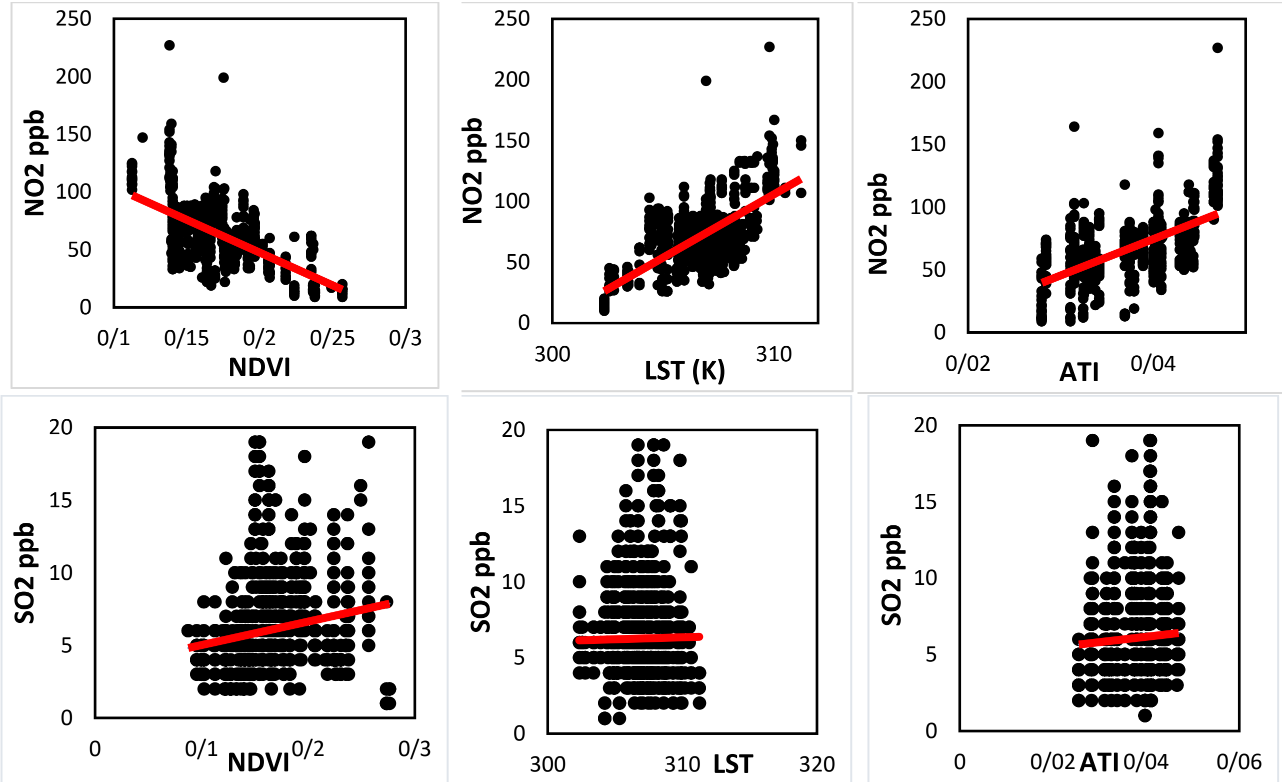
بررسی نمودار پراکندگی ارتباط آلاینده‌های NO2، SO_2 و CO با شاخص‌های سنجش‌ازدوری در فصل بهار نشان می‌دهد که این ارتباط با شاخص پوشش گیاهی حالت معکوس و با شاخص‌های دمای سطح خاک و اینرسی حرارتی حالت مستقیم دارد. همچنین خروجی نقشه NDBI (شکل ٤) و آلاینده‌های CO، NO2 و SO2 در فصل تابستان و بهار در شکل ٥ نمایش داده شده است. براساس نقشه NDBI مناطق مرکزی، جاده‌های شهری، مناطق جنوبی و شرقی بیشترین تمرکز سطوح نفوذناپذیر وجود دارد. مقایسه پراکندگی فضایی آلاینده‌ها با شاخص NDBI تا حد زیادی تطابق بین مراکز و مناطق با سطوح نفوذناپذیر و غلظت‌های بالای آلودگی هوا را نشان می‌دهد.



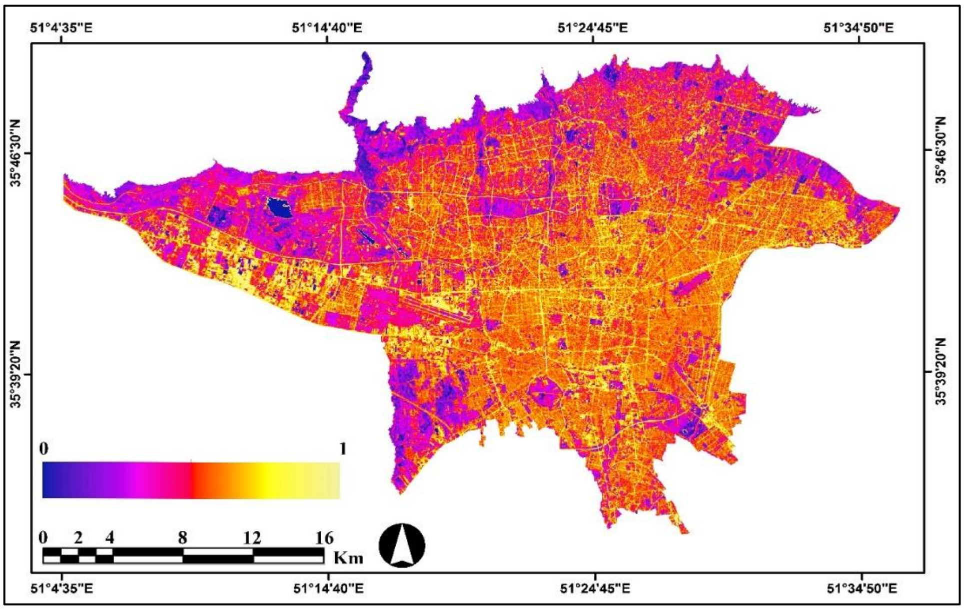


شکل ۲- پراکندگی داده‌های مربوط به آلاینده‌های NO_2، SO_2 و CO در فصل بهار نسبت به شاخص‌های سنجش‌ازدور (INERTIA، LST و NDVI)

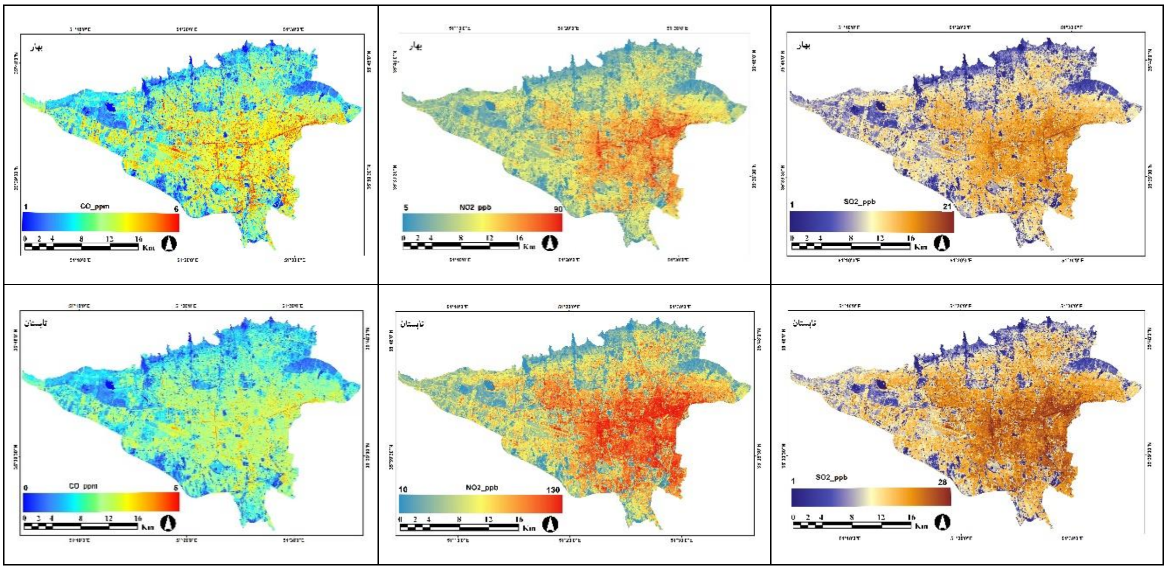




شکل ۳- پراکندگی داده‌های مربوط به آلاینده‌های NO_2، SO_2 و CO در فصل تابستان نسبت به شاخص‌های سنجش‌ازدور (INERTIA، LST و NDVI)



شکل ٤- مقدار شاخص NDBI در محدوده مطالعاتی



شکل ٥- پراکندگی آلاینده‌های NO_2، SO_2 و CO در تابستان و بهار در محدوده مطالعاتی

پراکندگی آلاینده‌های هوا در فصل تابستان و بهار (**شکل ٥**) نشان می‌دهد که مناطق شرقی و مرکزی شهر تهران که منطبق بر سطوح نفوذناپذیر یا ساخته شده است آلایندگی هوای بیشتری در این مناطق متمرکز است و در فصل تابستان هر سه آلاینده هوا میزان غلظت بیشتری در این مناطق دارد.

٤- بحث و جمع‌بندی

بر اساس نتایج به دست آمده بین سطوح نفوذناپذیر و دمای سطح زمین رابطه مستقیم وجود دارد (صفرراد و همکاران، ۱۳۹۸). بااین‌حال میزان همبستگی در فصل تابستان بیشتر است. می‌توان گفت که با جایگزینی فضاهای سبز با سطوح نفوذناپذیر و افزایش دمای هوا، بیلان انرژی شهری و آلبدو دچار تغییر افزایشی می‌شود. میزان بازتاب و نگه داشت انرژی در راستای رنگ و جنس سطوح نفوذناپذیر قرار دارد که موجب افزایش دمای شهری نیز می‌گردد (صفرراد و همکاران، ۱۳۹۸). با افزایش ساخت‌وساز، فضاهای سبز شهری و سرعت باد کاهش می‌یابد که این امر سبب افزایش دمای شهری و بالطبع تشکیل جزایر حرارتی و تمرکز آلاینده‌ها می‌شود. مطابق یافته‌های این تحقیق و سایر مطالعات انجام گرفته (محمودزاده و همکاران، ۱۳۹۷؛ ساسان‌پور و همکاران، ۱۳۹۲؛ هاشمی‌دره‌بادامی و همکاران، ۱۳۹۷) ارتباط بین سطوح نفوذناپذیر با دمای سطح و پوشش گیاهی، منفی است، به این معنی که فضاهای سبز دمای پایین‌تری نسبت به مناطق ساخته شده و پوشش آسفالت دارند. مطالعه گوا[1] و همکاران (۲۰۱۹) نشان دادند که میزان دمای سطح زمین در مناطق ساخته شده (نفوذناپذیر) نسبت به مناطق با سطوح نفوذپذیر ۲ درجه سانتی گراد بیشتر

1 Guo

است. همچنین براساس نتایج مشخص شد بین NDBI و NDVI رابطه معکوس وجود دارد که این همبستگی در فصل بهار بیشتر است. همچنین بین سطوح نفوذناپذیر و اینرسی حرارتی ظاهری رابطه مستقیم در هر دو فصل بهار و تابستان (همبستگی بیشتر در تابستان) وجود دارد. با توجه به این که اینرسی حرارتی به دو عامل تغییرات آلبدو و دمای سطح زمین بستگی دارد، اجسامی که دارای اینرسی و آلبدو بالا هستند تغییرات دمایی قابل‌توجهی را نشان می‌دهند؛ بنابراین اینرسی حرارتی بسته به نوع پوشش زمین، می‌تواند متفاوت باشد که در نتیجه تغییرات در کاربری اراضی ناشی از افزایش شهرنشینی است و تأثیر مستقیمی بر تغییرات دمایی در یک محیط شهری مانند تهران دارد (چن[1] و همکاران، ۲۰۱۷). شهر تهران طی سال‌های اخیر شاهد تغییراتی در الگوی توزیعی دمایی بوده است. به‌گونه‌ای که با افزایش ساخت‌وساز در سطح شهر، مساحت پهنه‌های با دمای متوسط و بسیار خنک کاهش یافته و پهنه‌های با دمای بالا و بسیار گرم افزایش یافته است. در طی سال‌های ۱۹۸۶ تا ۲۰۱۰ بیش از نیمی از پوشش گیاهی نواحی غرب و جنوب غربی تهران تخریب شده است (صفرراد و همکاران، ۱۳۹۸)؛ بنابراین افزایش تأسیسات شهری منجر به افزایش سطوح نفوذناپذیر و از بین رفتن سطوح نفوذپذیر مانند پوشش گیاهی می‌گردد. سطوح غیرقابل نفوذ مقادیر آلبدو زیاد و رطوبت کمی دارند. تبخیر و تعرق و سایه‌اندازی ساختمان‌ها میزان گرمایی که توسط نماها و سطوح سخت بازتاب می‌شود را افزایش می‌دهد (سانگ[2] و همکاران، ۲۰۲۰). بررسی نتایج نشان می‌دهد که بین دمای سطح زمین و آلاینده SO_2 در فصل بهار همبستگی بیشتری نسبت به فصل تابستان و سایر آلاینده‌ها وجود دارد. همچنین در فصل بهار و تابستان بیشترین همبستگی بین پوشش گیاهی با آلاینده SO_2 مشاهده می‌شود که با نتیجه مطالعه وو[3] و همکاران (۲۰۲۲) منطبق است. برای اینرسی حرارتی ظاهری بیشترین همبستگی با CO در فصل تابستان مشاهده شد. افزایش غلظت آلاینده‌ها در تابستان به دلیل سیستم کم فشار حرارتی کویر مرکزی اتفاق می‌افتد. کاهش غلظت آلاینده‌ها در بهار می‌تواند به دلیل اعتدال هوا و کاهش استفاده از انرژی‌های فسیلی برای گرمایش و سرمایش هوا باشد (ملک حسینی و سلیمانی، ۱۳۹۷).

بررسی مقدار NDVI در شهر تهران نشان داد که هرچه پوشش گیاهی پراکنده‌تر باشد میزان دمای سطح زمین نیز بالاتر بوده و بالطبع بیشتر مستعد افزایش غلظت آلاینده‌ها هستند. این در حالی است که مناطق با پهنه‌های بزرگتر پوشش گیاهی با کاهش دما روبرو شده و از میزان غلظت آلاینده‌ها کاسته است که نتیجه مطالعات جی[4] و همکاران (۲۰۲۰) نیز بیانگر این موضوع است. همچنین جاده‌های درون‌شهری و مسیرهای پر تردد مانند مراکز تجاری غلظت آلایندگی بالاتری نسبت به مناطق کم تردد دارند. تراکم ترافیک در این مناطق به دلیل استفاده از خودروهای شخصی و وسایل حمل و نقل عمومی باعث افزایش غلظت آلاینده‌ها می‌شود. مناطق صنعتی در قسمت‌های شرقی، جنوبی و

1 Chen
2 Song
3 Wu
4 Ge

مناطق پرجمعیت مرکزی شهر تهران سهم بیشتری در آلودگی هوای ناشی از ترافیک را به خود اختصاص می‌دهند؛ زیرا این قسمت‌ها به مناطق پست خشک با رطوبت و سرعت باد کمتر نزدیک‌تر است (جوانبخت و همکاران، ۲۰۲۱). همچنین تمرکز عمده صنایع در غرب تهران و الگوی غالب بادهای غربی، آلاینده‌های هوا را به سمت مرکز و شرق تهران جابجا می‌کند. در این مناطق ساختمان‌های مرتفع هوای آلوده را در قسمت‌های مرکزی شهر به دام می‌اندازند (قطبی و همکاران، ۲۰۱۶). وجود سدهای کوهستانی شمال و شرق به‌عنوان مانعی برای خروج مواد زاید محسوب می‌شوند که توسط بادهای غربی به داخل فضای شهر آورده شده‌اند. در نتیجه باعث می‌شود که هوای نواحی مرکزی و شرقی آلوده‌تر باشند. افزایش فضای سبز در فصل بهار تا حدود زیادی شرایط مناسبی برای کاهش دما فراهم می‌کند، اما با افزایش دما، پایداری هوا و کاهش سرعت باد در فصل تابستان غلظت آلاینده‌ها (به ویژه NO_2 و CO) افزایش می‌یابد. آلودگی هوا تحت تأثیر عوامل زیادی مانند میزان انتشار از منابع آلودگی، موقعیت جغرافیایی و شرایط هواشناسی قرار دارد (کالیسا[1] و همکاران، ۲۰۱۸). عوامل هواشناسی نقش پررنگی در شکل‌گیری، تجمع و پراکندگی آلاینده‌های هوا ایفا می‌کند (سلیمان[2] و همکاران، ۲۰۲۱). برای مثال افزایش ساعات آفتابی موجب افزایش استفاده از انرژی، پراکندگی گازهای گلخانه‌ای و افزایش آلودگی هوا می‌شود (جوانبخت و همکاران، ۲۰۲۱) که در تابستان شهر تهران این حالت مشهود است. مطابق با نتایج مطالعات صورت گرفته در طی فصول گرم سال الگوی کم‌فشار پاکستان و ایران مرکزی در تراز ۸۵۰ و ۹۲۵ هکتوپاسکال باعث به وجود آمدن جوی ناپایدار و افزایش آلودگی هوا در قسمت شرقی تهران می‌گردد. با این وجود پرارتفاع عربستان عامل اصلی آلودگی هوای شهر تهران محسوب می‌شود که باعث پایداری و نزول هوا در این منطقه می‌شود (لشکری و همکاران، ۱۳۹۹). همچنین مطالعه نشان می‌دهد که استقرار سامانه پرفشار بر روی زاگرس و نواحی جنوبی البرز، وجود زبانه کم فشار در نواحی جنوب شرق دریای خزر و وجود پرفشار دیگر در بخش‌های شمال–شرق کشور، کاهش لایه آمیختگی به حدود ۵۰ تا ۲۰۰ متر باعث تشدید آلودگی هوا در شهر تهران می‌شود. همچنین ایجاد نیروی گرادیان فشار باعث شکل‌گیری جریانات ضعیف جنوب و جنوب غربی سطح زمین می‌شود که با محدودیت در شدت و برد بادهای شبانه کوه به دشت و وجود کوه‌ها مانند سدی در مقابل این جریانات، باعث تشدید پایداری جو و انباشتگی آلاینده‌ها در یک لایه نازک سطحی بر روی شهر تهران می‌گردد (سعادت‌آبادی و قصابی، ۱۳۹۰). همه این عوامل سبب می‌شوند که مقدار آلاینده‌ها در تابستان در سطوح نفوذناپذیر که بیشتر در مناطق شرقی و مرکزی تهران متمرکز است، به اوج خود برسد.

1 Kalisa
2 Sulaymon

این مطالعه می‌تواند یک هشــدار برای برنامه‌ریزان شــهری و مدیران شــهری باشــد که اقداماتی در جهت حفظ فضـاهای سـبز و کنترل فضـاهای غیرقابل نفوذ انجام دهند تا محیط شـهری را به یک محیط سـالم با برقراری آسـایش حرارتی با افزایش فضاهای سبز و درختان همیشه سبز برای تمام گروه‌های سنی تبدیل کنند.

کتابنامه

اصغری‌سراسکانرود، صیاد؛ امامی، هادی؛ ۱۳۹۷. پایش دمای سطح زمین و بررسی رابطه کاربری اراضی با دمای سطح با اسـتفاده از تصـاویر سـنجنده OLI و +ETM (مطالعه موردی: شـهرسـتان اردبیل). *تحقیقات کاربردی علوم جغرافیایی*، دوره ۱۹، شماره ۵۳، ۲۱۵–۱۹۵.
http://dx.doi.org/10.29252/jgs.19.53.195

آروین، عباســعلی؛ ۱۳۹۷. بررســی جزیره حرارتی در ارتباط با آلودگی هوا در شــهر اصــفهان. *جغرافیا و مخاطرات محیطی*، دوره ۷، شماره ۱، ۱۲۹–۱۱۵.
https://doi.org/10.22067/geo.v7i1.64590

خسـروی، یونس؛ حیدری، محمدعلی؛ توکلی، آزاده؛ زمانی، عباسـعلی؛ ۱۳۹٦. تحلیل رابطه تغییرات زمانی دمای سـطح زمین و الگوی فضـایی تغییرات کاربری اراضـی (مطالعه موردی: شـهر زنجان). *برنامه‌ریزی و آمایش فضـا*، دوره ۲۱، شماره ۳، ۱٤٤–۱۱۹.
http://hsmsp.modares.ac.ir/article-21-4560-fa.html

رفیعیان، مجتبی؛ شــالی، محمد؛ ۱۳۹۱. تحلیل فضــایی ســطح توســعه یافتگی شــهر تهران به تفکیک مناطق شــهری. *برنامه‌ریزی و آمایش فضا*، دوره ١٦، شماره ٤، صص ٤٧–٢٦.
http://hsmsp.modares.ac.ir/article-21-5052-fa.html

رنجبرســعادت‌آبادی، عباس؛ قصــابی، زهرا؛۱۳۹۰. مطالعه همدیدی الگوهای جوی حاکم بر روی تهران در روزهای با آلودگی بسیار شدید هوا. پژوهش‌های اقلیم شناسی، دوره دوم، شمار ۵ و ٦، ٥٦–۳۹.
https://www.sid.ir/fa/VEWSSID/J_pdf/4007513900603.pdf

زبردسـت، اسـفندیار؛ ریاضـی، حسـین؛ ۱۳۹۳. شـاخص‌های محیط انسـان سـاخت و تأثیرات آن بر آلودگی هوا. *هنرهای زیبا، معماری و شهرسازی*، دوره ۲، شماره ۱، ٦٦–٥٥.
https://dorl.net/dor/20.1001.1.22286020.1394.20.1.5.6

ساسان‌پور، فرزانه؛ ضیائیان، پرویز؛ بهادری، مریم؛ ۱۳۹۲. بررسی رابطه کاربری و پوشش اراضی و جزایر حرارتی شهر تهران. *بین المللی انجمن جغرافیای ایران*، دوره ۱۱، شماره ۳۹، ۲۷۰–۲٥٦.
https://gisj.sbu.ac.ir/article_94232_fb3a7adefdf354c9f11d03655c231582.pdf

سجادیان، ناهید؛ ۱۳۹٤. پیش‌بینی آلودگی هوای ناشی از حمل ونقل شهری کلانشهر تهران با بهره‌گیری از تلفیق GIS با مدل LUR و شبکه عصبی مصنوعی. *اطلاعات جغرافیایی*، دوره ٢٤، شماره ۹۵، ۱۲۰–۱۰۷.
http://ensani.ir/file/download/article/20160405114926-9987-215.pdf

شرعی‌پور، زهرا؛ مزرعه‌فراهانی، مجید؛ ۱۳۸۶. بررسی تغییرات اوزون کلی جو و نقش آلاینده SO_2 گشت سپهری (تروپوسفری) در تغییرات اوزون کلی اندازه‌گیری شده با دستگاه دابسون موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران. فیزیک زمین و فضا، دوره ۳۳، شماره ۳، ۹۹-۱۱۳.
https://jesphys.ut.ac.ir/article_19311.html?lang=fa

شریفی‌سده، مریم؛ احمدی‌ندوشن، مژگان؛ ۱۳۹۷. کاربرد روش رگرسیون کاربری اراضی (LUR) در مدل‌سازی فضایی آلاینده‌های هوا در شهر اصفهان. علوم *محیطی*، دوره ۱۶، شماره ۲، صص ۲۱۶-۲۰۳.
https://envs.sbu.ac.ir/article_97939_de56c3f37c9dea897a55631186b9350a.pdf

شفیعی، هادی؛ عبداللهی‌کاکرودی، عطاالله؛ کیاورزمقدم، مجید؛ ۱۳۹۶. ارزیابی روند حرارتی، پوشش گیاهی و اراضی ساخته شده کلان شهر تهران در سه دهه اخیر. *همایش ملی ژئوماتیک*، دوره ۱۰، شماره ٤، ۱۸-۱.
https://elmnet.ir/vslg?url=https%3A%2F%2Fwww.sid.ir%2Ffa%2Fseminar%2FViewPaper.aspx%3FID%3D89954&type=0&id=20699643

صفرراد، طاهر؛ یوسفی، یداله؛ رضایی‌طالعی، عاطفه؛ ۱۳۹۸. واکاوی تغیرات سطوح نفوذناپذیر و دمای سطح زمین در قائم شهر. تحقیقات کاربردی علوم جغرافیایی، دوره ۲، شماره ٦۲، ۱۹۹-۱۸۳.
https://jgs.khu.ac.ir/browse.php?a_id=3374&sid=1&slc_lang=fa

کاوسی، امیر؛ سفیدکار، ریحانه؛ علوی‌مجد، حمید؛ رشیدی، یوسف؛ ایمانزاد، معصومه؛ نورمرادی، حشمت‌الله؛ ۱۳۹۲. تحلیل فضایی آلودگی هوای شهر تهران با استفاده از مدل‌های اتولجستیک، اتولجستیک مرکزی شده و روش کریگینگ نشانگر. *دانشگاه علوم پزشکی ایلام*، دوره ۲۱، شماره ۷، ۲۱٤-۲۰٦.
http://sjimu.medilam.ac.ir/article-1-1604-fa.html

لشکری، حسن؛ کیخسروی، قاسم؛ کریمیان، ندا؛ ۱۳۹۹. بررسی الگوهای همدیدی آلودگی‌های شدید هوا، در لایه وردسپهر زیرین کلانشهر تهران. *جغرافیا و مخاطرات محیطی*، دوره ۹، شماره ۳، ۲۰-۱.
https://geoeh.um.ac.ir/article_34363.html

متکان، علی‌اکبر؛ پوراحمد، احمد؛ منصوریان، حسین؛ میرباقری، بابک؛ حسینی اصل، امین؛ ۱۳۸۸. سنجش کفیت مکان‌های شهری، با استفاده از روش ارزیابی چند معیاره در GIS (مورد مطالعه : شهر تهران). *نشریه سنجش‌ازدور و GIS ایران*، دوره ۱، شماره ٤، صص ۲۰-۱.
https://gisj.sbu.ac.ir/article_94409_ba87d7a537546f4ae539cf143b05ed34.pdf

محمدی، اکبر؛ قرخلو، مهدی؛ زیاری، کرامت‌الله؛ پوراحمد، احمد؛ ۱۳۹۷. استفاده از مدل رگرسیون کاربری اراضی (LUR) برای پیش‌بینی آلاینده‌های NO2، CO و PM10 (مطالعهٔ موردی: شهر تهران). *پژوهش‌های جغرافیای انسانی*، دوره ۵۰، شماره ۱، صص ۱-۱٦.
https://doi.org/10.22059/jhgr.2014.51225

محمودزاده، حسن؛ نقدبیشی، افسانه؛ مؤمنی، سحر؛ ۱۳۹۷. تأثیر کاربری‌های شهری در ایجاد جزایر حرارتی (مطالعه موردی: شهر مشهد). *جغرافیا و مخاطرات محیطی*، دوره ۷، شماره ۲۷، ۱۰۵-۱۱۹.
https://doi.org/10.22067/geo.v0i0.68150

ملک حسینی، عباس؛ سلیمانی، فریبا؛ ۱۳۹۷. بررسی آلاینده‌های تاثیرگذار بر آلودگی هوای تهران و راهکارهای کنترل با توجه به شاخص کیفیت AQI. *نگرش‌های نو در جغرافیای انسانی*، دوره ۱۰، شماره ٤، ۷۳–٥٦.
https://geography.garmsar.iau.ir/article_544603.html

نورپور، علیرضا؛ فیض، سید محمدعلی؛ ۱۳۹۳. تعیین تغییرات مکانی و زمانی آلاینده‌های گوگرد دی اکسید، نیتروژن دی اکسید و انواع ذرات معلق با استفاده از تکنیک‌های GIS در شهر تهران. *محیط‌شناسی*، دوره ٤۰، شماره ۳، ۷۲۳–۷۳۸.
https://doi.org/10.22059/jes.2014.52216

هاشمی‌دره‌بادامی، سیروس؛ ۱۳۹٤. مدل‌سازی تغییرات سالانه جزیره حرارتی شهری و بررسی اثر آن بر میزان تغییرات آلودگی هوا (کلان شهر تهران). استاد راهنما علی درویشی بلورانی، پایان‌نامه کارشناسی ارشد سنجش‌ازدور، گرایش مطالعات شهری و روستایی دانشگاه تهران: ۱٤۲ صفحه.
http://jgs.khu.ac.ir/article-1-2745-fa.html

هاشمی‌دره‌بادامی، سیروس؛ درویشی‌بلورانی، علی؛ علوی‌پناه، سید کاظم؛ ملکی، محمد؛ ۱۳۹۷. تحلیل تغییرات جزیره حرارتی سطوح شهری در روز و شب با استفاده از محصولات چند زمانه سنجنده مادیس (مطالعه موردی: کلانشهر تهران). *تحقیقات کاربردی علوم جغرافیایی*، دوره ۱۹، شماره ٥۲، ۱۲۸–۱۱۳.
http://jgs.khu.ac.ir/article-1-2745-fa.html

وحدت، امیرحسین؛ علی‌محمدی، عباس؛ ۱۳۹۹. بررسی تغییرپذیری ساعتی رابطهٔ بین پارامترهای کاربری اراضی و آلایندهٔ CO، با استفاده از مدل رگرسیون کاربری اراضی (LUR) در شهر تهران، *فصلنامه سنجش‌ازدور و GIS ایران*، سال ۱۲، شماره ۱، ۱۸–۱. https://doi.org/10.52547/gisj.12.1.1

Amini, H., Taghavi-Shahri, S. M., Henderson, S. B., Naddafi, K., Nabizadeh, R., & Yunesian, M. 2014. Land use regression models to estimate the annual and seasonal spatial variability of sulfur dioxide and particulate matter in Tehran, Iran. Science of the Total Environment, 488, 343-353. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2014.04.106

Amiri, R., Weng, Q., Alimohammadi, A., & Alavipanah, S. K., 2009. Spatial–temporal dynamics of land surface temperature in relation to fractional vegetation cover and land use/cover in the Tabriz urban area, Iran. *Remote sensing of environment* 113(12): 2606-2617. https://doi.org/10.1016/j.rse.2009.07.021

Atkinson, R. W., Carey, I. M., Kent, A. J., van Staa, T. P., Anderson, H. R., & Cook, D. G., 2013. Long-term exposure to outdoor air pollution and incidence of cardiovascular diseases. *Epidemiology* 24(10): 44-53. https://doi.org/10.1097/ede.0b013e318276ccb8

Barnes, K. B., Morgan, J., & Roberge, M., 2001. Impervious surfaces and the quality of natural and built environments. Baltimore: *Department of Geography and Environmental Planning*, Towson University. www.ijesi.org/papers/Vol(4)5/E045027031.pdf

Buyadi, S. N. A., Mohd, W. M. N. W., & Misni, A., 2013. Impact of land use changes on the surface temperature distribution of area surrounding the National Botanic Garden, Shah Alam. *Procedia-Social and Behavioral Sciences*101 (15):516-525. https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2013.07.225

Chen, Y. C., Chiu, H. W., Su, Y. F., Wu, Y. C., & Cheng, K. S. 2017. Does urbanization increase diurnal land surface temperature variation? Evidence and implications. *Landscape and Urban Planning*, *157*, 247-258. https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2016.06.014

Erqou, S., Clougherty, J. E., Olafiranye, O., Magnani, J. W., Aiyer, A., Tripathy, S., & Reis, S. E., 2018. Particulate matter air pollution and racial differences in cardiovascular disease risk. *Arteriosclerosis, thrombosis, and vascular biology* 38(4): 935-942. https://doi.org/10.1161/ATVBAHA.117.310305

Feizizadeh, B., Blaschke, T., Nazmfar, H., Akbari, E., & Kohbanani, H. R., 2013. Monitoring land surface temperature relationship to land use/land cover from satellite imagery in Maraqeh County, Iran. *Journal of Environmental Planning and Management* 56(9):1290-1315. http://dx.doi.org/10.1080/09640568.2012.717888

Ge, X., Mauree, D., Castello, R., & Scartezzini, J. L. 2020. Spatio-temporal relationship between land cover and land surface temperature in urban areas: a case study in Geneva and Paris. *ISPRS* International *Journal of Geo-Information*, *9*(10), 593. https://doi.org/10.3390/ijgi9100593

Ghotbi, S., Sotoudeheian, S., & Arhami, M. 2016. Estimating urban ground-level PM_{10} using MODIS 3km AOD product and meteorological parameters from WRF model. *Atmospheric Environment*, *141*, 333-346. https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2016.06.057

Gorsevski, V., Taha, H., Quattrochi, D., & Luvall, J., 1998. Air pollution prevention through urban heat island mitigation: An update on the Urban Heat Island Pilot Project. *Proceedings of the ACEEE Summer Study, Asilomar*, CA 9(10): 23-32. www.aceee.org/files/proceedings/1998/data/papers/0903.PDF

Guo, L., Liu, R., Men, C., Wang, Q., Miao, Y., & Zhang, Y. (2019). Quantifying and simulating landscape composition and pattern impacts on land surface temperature: A decadal study of the rapidly urbanizing city of Beijing, China. *Science of the Total Environment*, *654*, 430-440. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.11.108

Hashim Mohammed, B., & Abdullah Sultan, M., 2010. Using remote sensing data and GIS to evaluate air pollution and their relationship with land cover and land use in Baghdad City. *Iranian Journal of Earth Sciences* 2(1): 20-24. https://ijes.mashhad.iau.ir/article_522638_4213861c139f0d22ad68e0355e8dc29a.pdf

Hu, M., Wang, Y., Wang, S., Jiao, M., Huang, G., & Xia, B. 2021. Spatial-temporal heterogeneity of air pollution and its relationship with meteorological factors in the Pearl River Delta, China. Atmospheric Environment, 254, 118415. https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2021.118415

Ibrahim, F., & Rasul, G., 2017. Urban land use land cover changes and their effect on land surface temperature: Case study using Dohuk City in the Kurdistan Region of Iraq. *Climate* 5(1): 1-18. https://doi.org/10.3390/cli5010013

Javanbakht, M., Boloorani, A. D., Kiavarz, M., Samany, N. N., Zebardast, L., & Zangiabadi, M. 2021. Spatial-temporal analysis of urban environmental quality of Tehran, Iran. *Ecological Indicators*, *120*, 106901. https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.106901

Jiménez-Muñoz, J. C., & Sobrino, J. A., 2008. Split-window coefficients for land surface temperature retrieval from low-resolution thermal infrared sensors. *IEEE geoscience and remote sensing letters* 5(4): 806-809. http://dx.doi.org/10.1109/LGRS.2008.2001636

Jiménez-Muñoz, J. C., Sobrino, J. A., Skoković, D., Mattar, C., & Cristóbal, J., 2014. Land surface temperature retrieval methods from Landsat-8 thermal infrared sensor data. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters* 11(10):1840-1843. https://doi.org/10.1109/LGRS.2014.2312032

Kalisa, E., Fadlallah, S., Amani, M., Nahayo, L., & Habiyaremye, G. 2018. Temperature and air pollution relationship during heatwaves in Birmingham, UK. Sustainable cities and society, 43, 111-120. https://doi.org/10.1016/j.scs.2018.08.033

Kim, K. H., Kabir, E., & Kabir, S. 2015. A review on the human health impact of airborne particulate matter. *Environment international*, *74*, 136-143. https://doi.org/10.1016/j.envint.2014.10.005

Lenney, M. P., Woodcock, C. E., Collins, J. B., & Hamdi, H., 1996. The status of agricultural lands in Egypt: the use of multitemporal NDVI features derived from Landsat TM. *Remote Sensing of Environment* 56(1): 8-20. https://doi.org/10.1016/0034-4257(95)00152-2

Liang, S., 2005. Quantitative remote sensing of land surfaces (Vol. 30). John Wiley & Sons. https://onlinelibrary.wiley.com/doi/book/10.1002/047172372X

Mirzaei, P. A., 2015. Recent challenges in modeling of urban heat island. *Sustainable Cities and Society* 19:200-206. https://doi.org/10.1016/j.scs.2015.04.001

Mozumder, C., Reddy, K. V., & Pratap, D., 2013. Air pollution modeling from remotely sensed data using regression techniques. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing* 41(2): 269-277. http://dx.doi.org/10.1007/s12524-012-0235-2

Price, J. C., 1985. On the analysis of thermal infrared imagery: The limited utility of apparent thermal inertia. *Remote sensing of Environment* 18(1): 59-73. https://doi.org/10.1016/0034-4257(85)90038-0

Putrenko, V. V., & Pashynska, N. M. 2017. The Use of Remote Sensing Data for Modeling Air Quality in the Cities. ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 4, 57. https://doi:10.5194/isprs-annals-IV-5-W1-57-2017

Sobrino, J. A., Li, Z. L., Stoll, M. P., & Becker, F., 1996. Multi-channel and multi-angle algorithms for estimating sea and land surface temperature with ATSR data. *International Journal of Remote Sensing* 17(11): 2089-2114. http://dx.doi.org/10.1080/01431169608948760

Sohrabinia, M., & Khorshiddoust, A. M. 2007. Application of satellite data and GIS in studying air pollutants in Tehran. Habitat International, 31(2), 268-275. https://doi.org/10.1016/j.habitatint.2007.02.003

Song, J., Chen, W., Zhang, J., Huang, K., Hou, B., & Prishchepov, A. V. 2020. Effects of building density on land surface temperature in China: Spatial patterns and determinants. Landscape and Urban Planning, 198, 103794. https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2020.103794

Sulaymon, I. D., Zhang, Y., Hopke, P. K., Hu, J., Rupakheti, D., Xie, X., ... & She, Y. 2021. Influence of transboundary air pollution and meteorology on air quality in three major cities of Anhui Province, China. Journal of Cleaner Production, 329, 129641. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.129641

Vafa-Arani, H., Jahani, S., Dashti, H., Heydari, J., & Moazen, S., 2014. A system dynamics modeling for urban air pollution: A case study of Tehran, Iran. *Transportation Research Part D: Transport and Environment* 31: 21-36. https://doi.org/10.1016/j.trd.2014.05.016

Vienneau, D., De Hoogh, K., Bechle, M. J., Beelen, R., Van Donkelaar, A., Martin, R. V., ... & Marshall, J. D. 2013. Western European land use regression incorporating satellite-and ground-based measurements of NO2 and PM10. Environmental science & technology, 47(23), 13555-13564. https://doi.org/10.1021/es403089q

Wu, C. D., Chen, Y. C., Pan, W. C., Zeng, Y. T., Chen, M. J., Guo, Y. L., & Lung, S. C. C. 2017. Land-use regression with long-term satellite-based greenness index and culture-specific sources to model PM2.5 spatial-temporal variability. Environmental pollution, 224, 148-157. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2017.01.074

Wu, H., Hong, S., Hu, M., Li, Y., & Yun, W. 2022. Assessment of the factors influencing sulfur dioxide emissions in Shandong, China. *Atmosphere*, *13*(1), 142. https://doi.org/10.3390/atmos13010142

Yuan, F., & Bauer, M. E., 2007. Comparison of impervious surface area and normalized difference vegetation index as indicators of surface urban heat island effects in Landsat imagery. *Remote Sensing of environment* 106(3): 375-386. http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2006.09.003

Zheng, S., Zhou, X., Singh, R., Wu, Y., Ye, Y., & Wu, C., 2017. The spatiotemporal distribution of air pollutants and their relationship with land-use patterns in Hangzhou city, China. *Atmosphere* 8(6):1-18. https://doi.org/10.3390/atmos8060110